

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 004.036.01 НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ  
ПЕРМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
(ФИЛИАЛ – ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД)  
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 08.07.2021 № 69

О присуждении Сухановскому Андрею Николаевичу, гражданину России, ученой степени доктора физико-математических наук.

**Диссертация** «Конвективные течения различных масштабов в неподвижных и вращающихся замкнутых объемах» по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы» принята к защите 01.04.2021, протокол № 67, диссертационным советом Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр (филиал – Институт механики сплошных сред) Уральского отделения Российской академии наук, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1, утвержденным приказом Минобрнауки России № 87/нк от 26 января 2018 г.

**Соискатель** Сухановский Андрей Николаевич 1977 года рождения, в 1999 году с отличием окончил обучение на физическом факультете Пермского государственного университета, специальность «Физика». Диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Экспериментальные исследования спиральных течений жидкости в замкнутых объемах» по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы» Сухановский А.Н. защитил 19 мая 2005 г. в диссертационном совете Д 004.012.01, в Институте механики сплошных сред УрО РАН. Диплом кандидата наук ДКН No 028748 выдан 14 октября 2005 г. В настоящее время работает старшим научным сотрудником лаборатории физической гидродинамики Института механики сплошных сред УрО РАН – филиала ФГБУН Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН. Диссертация выполнена в лаборатории физической гидродинамики Института механики сплошных сред УрО РАН.

**Официальные оппоненты:**

1. Бердников Владимир Степанович, доктор физико-математических наук, с.н.с., главный научный сотрудник лаборатории интенсификации процессов теплообмена ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (г. Новосибирск);
2. Демин Виталий Анатольевич, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретической физики ФГАОУ ВО Пермский государственный национальный исследовательский университет (г. Пермь);
3. Пермяков Михаил Степанович, доктор физико-математических наук, с.н.с., заведующий лабораторией взаимодействия океана и атмосферы ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт им. В.И.Ильичева ДВО РАН (г. Владивосток);

дали положительные отзывы на диссертацию

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова Российской академии наук (ИФА им. А.М.Обухова РАН), г. Москва, в своем положительном заключении, составленном О.Г. Чхетиани, д.ф.-м.н., зам. директора ИФА им. А.М.Обухова РАН, заведующим лабораторией геофизической гидродинамики; М.В.Курганским, д.ф.-м.н., главным научным сотрудником лаборатории геофизической гидродинамики, и утвержденном директором ИФА им. А.М.Обухова РАН, д.ф.-м.н. С.Н. Куличковым, указала, что диссертация является законченной научно-исследовательской работой, выполненной соискателем самостоятельно и на высоком научном уровне. Полученные результаты отличаются большой научной и теоретической, а также практической значимостью. Достоверность и обоснованность результатов диссертации не вызывают сомнений, поскольку они получены с помощью современных апробированных экспериментальных методов, корректных математических моделей и надежных, хорошо зарекомендовавших себя вычислительных гидродинамических пакетов. В частных случаях они согласованы с признанными результатами других авторов. Представленная диссертационная работа «Конвективные течения различных масштабов в неподвижных и вращающихся замкнутых объемах» удовлетворяет требованиям Положения «О присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Сухановский Андрей Николаевич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

**Соискателем опубликовано** 28 статей в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК:

1. Большухин М.А., Васильев А.Ю., Будников А.В., Патрушев Д.Н., Романов Р.И., Свешников Д.Н., Сухановский А.Н., Фрик П.Г. Об экспериментальных тестах (бенчмарках) для программных пакетов обеспечивающих расчет теплообменников в атомной энергетике // Вычислительная механика сплошных сред. 2012. Т.5, №4. С.469-480.

*Описана возможность использования турбулентной конвекции в кубической полости в качестве бенчмарка для численных кодов, используемых для расчета теплообменников в атомной энергетике.*

2. Vasiliev A., Sukhanovskii A., Frick P., Budnikov A., Fomichev V., Bolshukhin M., Romanov R. High Rayleigh number convection in a cubic cell with adiabatic sidewalls // Int. J. of Heat and Mass Transfer. 2016. V.102. P.201-212.

*При помощи независимых экспериментальных реализаций исследована турбулентная конвекция Рэлея-Бенара в кубической полости и обоснована возможность использования данной конфигурации в качестве бенчмарка для численных кодов.*

3. Vasiliev A., Frick P., Kumar A., Stepanov R., Sukhanovskii A., Verma M.K. Transient flows and reorientations of large-scale convection in a cubic cell // Int. Communications in Heat and Mass Transfer. 2019. V.108. P.104319.

*Изучены переходные процессы крупномасштабной конвекции в кубической полости.*

4. Баталов В.Г., Сухановский А.Н., Фрик П.Г. Экспериментальное исследование спиральных валов в адвективном потоке, натекающем на горячую горизонтальную

поверхность // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2007. №4. С.39-49.

*Экспериментально исследовано формирование спиральных валов в прямоугольной полости в случае ступенчатого перепада температур.*

5. Teymurazov A., Sukhanovsky A., Batalov V., Frick P. Secondary convective flows in the rectangular tank with non-uniform heating // J. of Physics: Conference Series. 2011. V.318. P.082011.

*Экспериментально и при помощи прямого численного моделирования изучено формирование вторичных течений в прямоугольной полости.*

6. Sukhanovsky A., Batalov V., Teymurazov A., Frick P. Horizontal rolls in convective flow above a partially heated surface // The European Physical Journal B. 2012. V. 85, № 1. P.1-12.

*Экспериментально и численно исследовано формирование вторичных течений в виде конвективных валов различного типа, и особенности конвективного теплопереноса для широкого интервала управляющих параметров.*

7. Sukhanovskii A., Evgrafova A., Popova E. Horizontal rolls over localized heat source in a cylindrical layer // Physica D: Nonlinear Phenomena. 2016. V.316. P.23-33.

*Исследовано формирование горизонтальных валов над локализованным источником тепла в цилиндрическом слое.*

8. Evgrafova A., Sukhanovskii A., Kuchinskii M., Popova E. Influence of geometrical parameters on convective flows in non-uniformly heated cylindrical fluid layers // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. V.208. P.012016.

*Изучено влияние геометрических параметров на характеристики конвективных течений в неоднородно нагретом, вращающемся слое.*

9. Evgrafova A., Sukhanovskii A., Kuchinskii M. Influence of secondary flows on heat transfer from a localized heat source // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V. 899. P.022005.

*Изучено влияние вторичных течений на конвективный теплоперенос от локализованного источника тепла.*

10. Evgrafova A., Sukhanovskii A. Specifics of heat flux from localized heater in a cylindrical layer // Int. J. of Heat and Mass Transfer. 2019. V.135. P.761-768.

*Изучены особенности конвективного теплопереноса от локализованного источника тепла в цилиндрическом слое.*

11. Evgrafova A., Sukhanovskii A. Influence of aspect ratio on heat transfer in non-uniformly heated cylindrical fluid layers // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. V.581. P.012007.

*Изучено влияние аспектного отношения на конвективный теплоперенос в неоднородно нагретом цилиндрическом слое.*

12. Sukhanovskii A., Evgrafova A. Dependence of boundary layer thickness on layer height for extended localised heaters // Experimental Thermal and Fluid Science. 2021. V.121, P.110275.

*Исследована зависимость толщины пограничного слоя от высоты слоя для протяженных локализованных нагревателей.*

13. Batalov V., Sukhanovsky A., Frick P. Laboratory study of differential rotation in a convective rotating layer // Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics. 2010. V.104. P.349-368.

*Экспериментально и численно исследовано формирование дифференциального вращения*

- в тонком вращающемся слое вязкой жидкости, при наличии неоднородного нагрева.*
14. Sukhanovsky A. Formation of differential rotation in a cylindrical fluid layer // Fluid Dynamics. 2011. V.46, № 1. P.158-168.
- Численно исследована зависимость характеристик дифференциального вращения во вращающемся слое с неоднородным нагревом, от основных управляющих параметров.*
15. Евграфова А.В., Сухановский А.Н., Попова Е.Н. Потoki углового момента во вращающемся слое с локализованным нагревом // Вычислительная механика сплошных сред. 2016. Т.9, №4. С.498-508.
- Исследованы потоки углового момента во вращающемся слое с локализованным источником тепла.*
16. Sukhanovskii A., Evgrafova A., Popova E. Laboratory study of a steady-state convective cyclonic vortex // Quarterly Journal of Royal Meteorological Society. 2016. V.142, №698. P.2214-2223.
- Экспериментально исследованы характеристики стационарного конвективного циклонического вихря.*
17. Sukhanovskii A., Evgrafova A., Popova E. Non-axisymmetric structure of the boundary layer of intensive cyclonic vortex // Dynamics of Atmospheres and Oceans. 2017. V.80. P.12-28.
- Изучена неосесимметричная структура пограничного слоя интенсивного циклонического вихря.*
18. Sukhanovskii A., Evgrafova A., Popova E. Instability of cyclonic convective vortex // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. V.208. P.012040.
- Изучена устойчивость циклонического конвективного вихря.*
19. Sukhanovskii A., Shchapov V., Pavlinov A., Popova E. Laboratory model of tropical cyclone with controlled forcing // J. of Physics: Conference Series. 2018. V.1128. P.012133.
- Представлена лабораторная модель тропического циклона с контролируемым внешним воздействием.*
20. Sukhanovskii A., Evgrafova A., Pavlinov A., Popova E., Shchapov V. Different aspects of laboratory analog of tropical cyclone // IOP conference series: Earth and environmental science. 2019. V.231. P.012052.
- Изучены различные аспекты лабораторного аналога тропического циклона.*
21. Sukhanovskii A., Popova E. The importance of horizontal rolls in the rapid intensification of tropical cyclones // Boundary-Layer Meteorology. 2020. V.175, P.259-276.
- Исследовано влияние горизонтальных валов на процесс быстрой интенсификации тропических циклонов.*
22. Щапов В.А., Евграфова А.В., Масич Г.Ф., Павлинов А.М., Попова Е.Н., Сухановский А.Н., Чугунов Д.П. Применение суперкомпьютерной обработки данных от измерительных систем для проведения экспериментов с обратной связью // Программные системы : теория и приложения. 2018. Т.9, №1 (36). С.3-19.
- Представлена новая программно-аппаратная платформа для проведения экспериментов с обратной связью.*
23. Shchapov V.A., Pavlinov A.M., Popova E.N., Sukhanovskii A.N., Kalyulin S.L., Modorskii V.Y. Supercomputer real-time experimental data processing: technology and applications // Russian Supercomputing Days / Springer. 2018. P.641-652.

*Описана новая программно-аппаратная платформа для проведения экспериментов с обратной связью и ее апробация в виде лабораторного аналога тропического циклона.*

24. Колесниченко И., Сухановский А. Измерение спиральности в вихревых потоках // Труды Всероссийской конференции молодых ученых (с международным участием) «Неравновесные процессы в сплошных средах», г.Пермь. 2007. С.238-241.

*Проведено экспериментальное исследование спиральности в вихревых потоках.*

25. Евграфова А.В., Левина Г.В., Сухановский А.Н. Исследование распределения завихренности и спиральности при взаимодействии адвективного потока с вторичными структурами // Вычислительная механика сплошных сред. 2013. Т.6, №4. С.451-459.

*Изучено распределение завихренности и спиральности при взаимодействии адвективного потока с вторичными конвективными структурами в неподвижном слое.*

26. Sukhanovskii A., Evgrafova A., Popova E. Non-zero helicity of a cyclonic vortex over localized heat source // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V.754. P.072005–072005.

*Изучена спиральность циклонического вихря над локализованным источником тепла.*

27. Sukhanovskii A., Evgrafova A., Popova E. Helicity of convective flows from localized heat source in a rotating layer // Archive of Mechanical Engineering. 2017. V.64, №2. P.177-188.

*Изучена спиральность конвективных течений во вращающемся слое.*

28. Vasiliev A., Sukhanovskii A., Stepanov R. Numerical simulation of helical flow in a cylindrical channel // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2017. V.208. P.012011.

*Численно изучено формирование спирального течения за дивертором в цилиндрическом канале.*

29. Teimurazov A., Sukhanovskii A., Evgrafova A., Stepanov R. Helicity sources in a rotating convection // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V.899. P.022017.

*Численно исследованы источники спиральности во вращающемся конвективном слое.*

Публикации содержат в сумме 284 страницы и в полной мере отражают основные научные результаты работы. Недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах в тексте диссертации отсутствуют.

**На диссертацию и автореферат поступили отзывы:** от оппонентов и ведущей организации.

1. Положительный отзыв официального оппонента Бердникова В.С. В отзыве представлен анализ содержания диссертации, отмечается актуальность темы диссертации; новизна, научная и практическая значимость полученных результатов; обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций. Отмечено, что совокупность результатов можно квалифицировать как научное достижение в области геофизической гидродинамики. Оппонент отмечает следующие замечания по диссертации:

- вопрос о точности измерений температуры и методике контроля температуры;
- вопрос о сопряженном теплообмене на вертикальных стенках;
- вопрос о граничных условиях на верхней, свободной границе;
- вопрос о методике получения теневых картин;
- вопрос об организации нагрева и его контроля;
- замечание об оценке отношения силы Кориолиса и силы плавучести;
- замечание об оформлении раздела 4.4.

2. Положительный отзыв официального оппонента Демина В.А. В отзыве

отмечено, что по совокупности полученных результатов, научной значимости рассмотренных вопросов, широте использованных методов и подходов диссертация является крупным научным достижением в гидродинамике, а именно, технологии экспериментальных наблюдений и обработки данных в области тепловой конвекции. Оппонент отмечает следующие замечания по диссертации и автореферату:

- вопрос об организации адиабатических условий на вертикальных стенках;
- замечание об анализе пограничных слоев;
- замечание о связи работ диссертанта и Г.П. Богатырева;
- замечание о формулировке цели изучения турбулентной конвекции в кубической полости;
- несколько замечаний технического плана об оформлении автореферата.

3. Положительный отзыв официального оппонента Пермякова М.С. В отзыве отмечено, что совокупность изложенных в диссертации результатов можно квалифицировать как значительный вклад в решение ряда крупных актуальных задач в области экспериментальной и вычислительной гидродинамики. Оппонент отмечает следующие замечания:

- замечание об оценке количественных совпадений;
- замечание о требованиях к тестовым задачам (бенчмаркам);
- замечание об условиях на верхней, свободной границе;
- замечание о выборе безразмеривания и безразмерных комплексов;
- замечание о различных факторах, влияющих на формирование течения в реальной атмосфере;
- вопрос о смысле отдельных вкладов спиральности.

4. Положительный отзыв ведущей организации. В отзыве отмечается, что диссертация представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу в области термической конвекции, как в неподвижных, так и вращающихся полостях, заполненных жидкостью. Научная новизна и теоретическая значимость работы заключается в ясной и физически обоснованной постановке задач и корректной интерпретации результатов, которые в совокупности дают новые представления о механизмах генерации и трансформации вторичных движений при конвекции и на их роль при обеспечении термического и динамического режимов конвективных потоков. Практическая значимость полученных результатов связана с возможностью их применения в технике, включая атомную энергетику, для расчета динамических характеристик конвективных течений, в особенности определяющих теплоперенос в системе, а также в геофизике, при изучении тропических циклонов и интенсивных полярных (мезо-) циклонов. Полученные результаты могут с успехом найти применение в практике проектных организаций, в научно-исследовательской деятельности таких учреждений, как Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН, Объединенный институт высоких температур РАН, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова, Институт прикладной физики РАН, в учебной при создании новых спецкурсов в таких вузах как МГУ им. М.В. Ломоносова, МГТУ им. Н.Э.Баумана и других.

Ведущая организация отмечает следующие замечания:

- замечание об опечатках и англицизмах, отсутствия единообразия в обозначениях;
- замечание о записи последнего слагаемого в уравнении 1.4;
- замечание о разложении вертикальной скорости в ряд Фурье;
- замечание о моменте инерции вписанного в куб цилиндра;
- замечание об оформлении формул 2.1 и 2.2;
- замечание об используемой терминологии вихревых структур;
- вопрос о генерации добавочного углового момента;
- замечание об использовании различных безразмерных параметров;
- замечание о сводной сравнительной информации об используемых численных кодах.

**На автореферат поступило 9 отзывов:**

1. Положительный отзыв от Брацуна Д.А., д.ф.-м.н., доцента, зав. кафедрой прикладной физики ФГАОУ ВО Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь (4 замечания);
2. Положительный отзыв от Ерманюка Е.В., д.ф.-м.н., директора ФГБУН Институт гидродинамики им. М.А.Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск (2 замечания);
3. Положительный отзыв от Ингеля Л.Х., д.ф.-м.н., доцента, ведущего научного сотрудника Института экспериментальной метеорологии ФГБУ НПО «Тайфун», г. Обнинск (1 замечание);
4. Положительный отзыв от Кузаныяна К.М., д.ф.-м.н., ведущего научного сотрудника отдела физики Солнца и солнечно-земных связей ФГБУН Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН, г.Троицк (Москва) (2 замечания);
5. Положительный отзыв от Кузнецовой В.Н., д.т.н., профессора, профессора кафедры "Эксплуатация и сервис транспортно-технологических машин и комплексов в строительстве" ФГБОУ ВО Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, г. Омск (2 замечания);
6. Положительный отзыв от Перминова А.В., д.ф.-м.н., доцента, профессора кафедры общей физики ФГАОУ ВО Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь (4 замечания);
7. Положительный отзыв от Разуванова Н.Г., д.т.н., ведущего научного сотрудника ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва (3 замечания);
8. Положительный отзыв от Смирнова Е.М., д.ф.-м.н., профессора, профессора Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург (3 замечания);
9. Положительный отзыв от Шеремета М.А., д.ф.-м.н., доцента, заведующего научно-исследовательской лабораторией моделирования процессов конвективного теплопереноса ФГАОУ ВО Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск (3 замечания).

**В отзывах на автореферат содержатся следующие замечания:**

- неясно как согласуются результаты для цилиндрического слоя и прямоугольной полости, не приведены направления и перспективы дальнейших исследований;

- о точности формулировок на стр.4 и 8;
- о недостатке формул, отсутствии четкой формулировки профиля диссертации (экспериментального или численного), малого количества параметров в лабораторной модели тропических циклонов и орфографии;
- о личном участии автора в проведении экспериментов, оформлении рисунков и определении суперротации;
- об отсутствии искажений формы свободной поверхности, ссылки на публикацию на русском языке;
- о сопоставлении расчетных и экспериментальных данных, недостаточно информативных подписях к рисункам, отсутствии подробного описания комплекса для проведения экспериментов с обратной связью;
- об оформлении списка литературы;
- о формулировке метода анализа динамики крупномасштабной циркуляции, отсутствии описания подсеточной модели при моделировании методом крупных вихрей, повторений при описании экспериментальных установок;
- вопрос об анализе направления оси вращения, использования собственных численных кодов.

В отзывах отмечено, что диссертация является законченным исследованием и представляет научный интерес, прошла достаточную апробацию, содержит новые результаты, достоверность которых обоснована, тема работы является актуальной, результаты имеют высокую научную ценность и большое прикладное значение.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

**официальные оппоненты** являются одними из ведущих специалистов в области физической гидродинамики, конвективного теплообмена и геофизической гидродинамики, имеют большое число публикации с результатами теоретических и экспериментальных исследований различных гидродинамических систем; обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов;

**ведущая организация** ФГБУН Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, г. Москва, является одним из ведущих научных центров в области науки об атмосфере. Здесь современными теоретическими и экспериментальными методами проводятся исследования по широкому кругу проблем, включающих в себя задачи теории климата; изучения динамических процессов в атмосфере; гидродинамику вращающихся жидкостей; естественную конвекцию; моделирование геофизических течений и др. Разрабатываются рекомендации по использованию полученных фундаментальных результатов для решения конкретных научных и прикладных задач. В Институте сформировалась и действует научная школа под руководством академиков Г.С. Голицына и И.И. Мохова. С 1999 г. деятельность школы поддерживается специальным грантом Президента России по поддержке ведущих научных школ. ИФА – учредитель журнала "Известия РАН, Физика атмосферы и океана". Многие сотрудники Института являются членами редакционных коллегий отечественных и международных научных журналов. Отзыв ведущей организации, содержащий подробную, по главам,

характеристику содержания диссертационной работы; высокую положительную оценку актуальности темы исследования, достоверности, новизны, теоретической и практической значимости изложенных результатов обсужден и одобрен на научном семинаре лаборатории геофизической гидродинамики отдела динамики атмосферы в присутствии признанных авторитетных специалистов по теме защищаемой диссертации.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

**разработан** новый подход к реализации конвективных тепловых потоков в лабораторной модели тропических циклонов, открывающий широкие возможности по изучению различных систем с обратной связью;

**предложены** оригинальные подходы и методы исследований, позволившие описать процесс переориентации крупномасштабной циркуляции в замкнутой полости и формирование дифференциального вращения при наличии неоднородного нагрева;

**доказана** необходимость использования интегральных характеристик конвективных течений при анализе крупномасштабной циркуляции в замкнутых полостях;

**введены** и систематизированы различные типы вторичных течений и безразмерные критерии для их описания в случае ступенчатого перепада температур в прямоугольной и цилиндрической полостях.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

**доказана** необходимость учета влияния вторичных течений на конвективный теплоперенос в условиях естественной конвекции и доказана корректность предложенной модели крупномасштабной циркуляции в конвекции Рэлея-Бенара в кубической полости;

**Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов):**

**использованы** современные методы панорамных измерений скорости (PIV, StereoPIV), пакеты вычислительной гидродинамики на основе метода конечных объемов, специализированное программное обеспечение для автоматизации измерений и сбора данных, реализована оригинальная методика измерений полей скорости в режиме реального времени (real-time PIV);

**изложены** физические соображения, объясняющие перестройку структуры крупномасштабной циркуляции в кубической полости, формирования поперечных конвективных валов над локализованным нагревателем и быструю интенсификацию лабораторного аналога тропического циклона;

**изучены** структура и динамика крупномасштабной циркуляции в кубической полости в условиях турбулентной конвекции Рэлея-Бенара, основные моды неустойчивости адвективного потока над нагретой поверхностью для различных геометрий, граничных условий и характеристик жидкости;

**проведена модернизация** экспериментального стенда, позволившая автоматизировать измерения температуры и тепловых потоков и реализовать панорамные измерения скорости во вращающейся системе координат.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

**разработана и внедрена** новая методика измерения полей скорости в режиме реального

времени (real-time PIV), обоснована методика прямого измерения спиральности течения в прямом канале методом Stereo PIV;

**определены** области существования вторичных конвективных течений, область устойчивости интенсивного циклонического вихря, зависимости числа Нуссельта от числа Рэлея в случае локализованного нагрева. Результаты могут быть использованы при планировании экспериментальных исследований и проектировании технологических процессов, в которых конвективный теплоперенос является доминирующим;

**создана** база экспериментальных данных для верификации теоретических моделей, описывающих крупномасштабную циркуляцию в кубической полости и дифференциальное вращение во вращающемся слое с неоднородным нагревом;

**представлены** методические рекомендации по планированию экспериментов, направленных на исследование конвекции при наличии открытой поверхности и вращения, раскрыты перспективы дальнейшей разработки темы исследований.

#### **Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

**экспериментальные работы** проведены с применением поверенного оборудования и современных экспериментальных методов исследования, что позволило обеспечить воспроизводимость и высокую точность полученных результатов;

**теория** построена на основе анализа полученных в работе данных и согласуется с представленными в диссертации результатами математического моделирования и экспериментов;

**идея базируется** на обобщении результатов предыдущих исследований крупномасштабных и мелкомасштабных конвективных течений в различных условиях, результатах тестовых вычислений и экспериментов.

**установлено** качественное и количественное соответствие полученных данных известным результатам математического моделирования и экспериментальных исследований в предельных случаях;

**использованы** современные экспериментальные методики визуализации, измерения скорости и температуры, методы цифровой обработки и статистического анализа данных.

**Личный вклад соискателя состоит в** постановке задач, планировании исследований, интерпретации результатов и участии в создании и модернизации экспериментальных установок, проведении опытов, численных расчетов и обработке полученных результатов.

**Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи (проблемы) и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается** наличием последовательного плана исследования, концептуальности и взаимосвязи основных выводов.

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует требованиям п. 9 "Положения о присуждении ученых степеней" № 842, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г.: в ней содержатся закономерности, определяющие эволюцию потоков и процесс конвективного теплопереноса, в конвективных течениях, состоящих из

крупномасштабной циркуляции и мелкомасштабных структур различного типа, в неподвижных и вращающихся замкнутых объемах, с геофизическими приложениями.

На заседании 08 июля 2021 г. диссертационный совет принял решение присудить Сухановскому А.Н. ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении открытого голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 9 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании (в том числе 6 человек в удаленном интерактивном режиме), из 21 человека, входящего в состав совета, дополнительно введено на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 17, против – 1, воздержался – 1, не проголосовало – 0.

Председатель  
диссертационного совета Д 004.036.01  
д.т.н., профессор, академик РАН  
Матвеевко Валерий Павлович



\_\_\_\_\_ / Матвеевко В.П

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 004.036.01  
д.ф.-м.н., доцент  
Зуев Андрей Леонидович



\_\_\_\_\_ / Зуев А.Л.

09 июля 2021 г.

